

复合材料 结构力学

张志民 主编

张志民 张开达 杨乃宾 编著

北京航空航天大学出版社

复合材料结构力学

张志民 主编

张志民 张开达 杨乃宾 编著

北京航空航天大学出版社

(京)新登字166号

图书在版编目(CIP)数据

复合材料结构力学/张志民编著.-北京:北京航空航天大学出版社,1993.9

ISBN 7-81012-174-X

I.复…

II.张…

III.复合材料结构力学

IV.TB330.1

复合材料结构力学

FUHECAILIAO JIEGOU LIXUE

张志民 主编

张志民 张开达 杨乃宾 编著

责任编辑 袁冬林

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经销

通县瓦子店印刷厂印装

850×1168 1/32 印张:15.75 字数:423千字

1993年9月第一版 1993年9月 第一次印刷 印数:3000册

ISBN 7-81012-174-X/TB·029 定价:5.00元

序

复合材料是一种新近发展起来的新材料，也是高新技术之一，它的发展情况如何，标志着一个国家的科技水平、经济优势和社会建设实力。这种新型材料发展前途很大，应用也非常广泛。20多年来，国际间对它非常重视，并且是航空、航天、汽车、建筑、化工、造船以及生物与体育用品等许多部门不可缺少的结构材料。本书力求高标准、新要求，并希望与众不同。这些都是符合“搞科技、越高越好、越新越好。越高越新，人民高兴，国家高兴。”精神的。当今占应用主导地位纤维增强复合材料的发展日臻完善，进一步促进了非均质各向异性弹性力学的发展及复合材料结构力学在理论分析与方法研究诸方面的深化与创新，这也促使国内外许多学者近些年来相继出版了不少关于复合材料力学方面的著作，但这些著作多为介绍复合材料力学的一些基本内容，而很少反映复合材料在结构分析应用时的一些基本知识、基本方程和基本求解方法以及一些必须建立的重要特殊概念和独特问题的处理方法，以致于使得学校和生产研究单位的许多读者，在学习了复合材料力学之后，似乎还没有进入复合材料的新领域，对遇到的不少新概念和新问题还不知如何处理。

由国家规划、教委资助出版的这本“复合材料结构力学”一书，就向编著者提出了新的更高的要求。由于该书的作者们常年地工作在复合材料学科教学与科学研究工作的第一线，有着比较丰富的理论知识和实践经验。在多年工作的基础上，编著该书时汲取了国内外许多著作和文献内容的长处，既重视了复合材料力学方面的一些基础理论知识，也以足够的篇幅，有条理地、重点突出地介绍了复合材料结构分析应用方面的许多典型工作状态、

目 录

第一章 绪 论	(1)
1.1 复合材料的发展历史及其应用	(1)
1.2 复合材料的定义和分类	(7)
1.2.1 复合材料的定义	(7)
1.2.2 复合材料的分类	(7)
1.2.3 纤维增强复合材料性能特点	(8)
1.3 复合材料结构力学的研究内容与方法	(11)
1.4 名词术语	(12)
第二章 各向异性弹性体的本构关系	(15)
2.1 广义虎克定律	(15)
2.2 应变能密度函数 U	(19)
2.3 具有弹性对称性的几种典型情况	(23)
2.3.1 具有一个弹性对称面的情况	(23)
2.3.2 具有三个相互正交的弹性对称面的情况 ——正交各向异性体.....	(27)
2.3.3 具有一个各向同性面的情况——横观各向 同性体	(30)
2.3.4 各向同性情况	(32)
2.4 弹性系数的坐标转换	(33)
2.5 坐标系统绕轴旋转时, 弹性系数的转换	(42)
2.6 各向异性弹性力学的几个基本概念问题	(48)
2.6.1 各向异性悬挂直杆	(48)
2.6.2 各向异性直杆的弯曲	(53)
2.6.3 各向异性矩形板周边受均布弯矩和扭矩作	

用时的弯曲·····	(56)
2.7 各向异性弹性体的二维分析 ·····	(58)
2.7.1 广义平面应力状态·····	(58)
2.7.2 平面应变状态·····	(61)
第三章 层合板的弹性特征 ·····	(65)
3.1 单层板的正轴刚度和偏轴刚度特性 ·····	(65)
3.1.1 单层板的正轴刚度·····	(65)
3.1.2 不同直角坐标系的应力转换和应变转换·····	(67)
3.1.3 单层板的偏轴刚度·····	(72)
3.2 不变量概念 ·····	(75)
3.2.1 应力(应变)不变量·····	(75)
3.2.2 刚度不变量·····	(76)
3.2.3 模量圆·····	(79)
3.2.4 偏轴工程弹性系数·····	(80)
3.3 一般层合板的弹性分析 ·····	(84)
3.3.1 基本假设·····	(85)
3.3.2 一般层合板的弹性特性·····	(86)
3.4 对称层合板的刚度特性 ·····	(91)
3.4.1 对称层合板的弹性特性·····	(91)
3.4.2 面内力作用下的对称层合板·····	(92)
3.4.3 弯(扭)矩作用下的对称层合板·····	(95)
3.5 反对称板和规则非对称正交板的刚度特性 ·····	(101)
3.5.1 反对称层合板·····	(101)
3.5.2 规则非对称正交层合板·····	(105)
3.6 平行移轴定理 ·····	(108)
3.7 铺层应力应变分析 ·····	(112)

第四章 复合材料的强度理论	(120)
4.1 基本概念	(120)
4.1.1 各向同性材料强度理论的概念	(120)
4.1.2 单向复合材料强度概念的特殊性	(121)
4.2 最大应力理论和最大应变理论	(123)
4.2.1 最大应力理论	(123)
4.2.2 最大应变理论	(124)
4.3 蔡-希尔(Tsai-Hill)理论和霍夫曼(Hoffman) 理论	(127)
4.3.1 蔡-希尔理论	(127)
4.3.2 霍夫曼理论	(130)
4.4 蔡-胡(Tsai-Wu)张量理论	(130)
4.4.1 应力空间	(130)
4.4.2 蔡-胡张量多项式	(132)
4.4.3 蔡-胡强度判据	(132)
4.5 二阶张量理论的偏轴方程和三阶张量理论	(134)
4.5.1 二阶张量理论的偏轴方程	(134)
4.5.2 三阶张量理论	(137)
4.6 强度比	(139)
4.7 层合板的强度分析	(142)
4.7.1 最上一层失效强度	(142)
4.7.2 层合板的极限强度	(146)

第五章 复合材料层合薄板的弯曲、屈曲与振动问题的

求解	(154)
5.1 层合板的弯曲、屈曲与振动基本方程	(154)
5.1.1 基本假设	(154)
5.1.2 基本方程	(155)

5.2	特殊层合板弯曲问题的求解	(164)
5.2.1	特殊正交各向异性层合板	(164)
5.2.2	对称角铺设层合板	(167)
5.2.3	规则非对称正交铺设层合板	(170)
5.2.4	规则反对称角铺设层合板	(174)
5.3	特殊层合板屈曲问题的求解	(179)
5.3.1	特殊正交各向异性层合板	(179)
5.3.1.1	四边简支层合板, 在均布压力 \bar{N}_x 作用下的屈曲 问题求解	(182)
5.3.1.2	两对边简支, 另两对边为任意支持的层合板, 在 均布压力 \bar{N}_x 作用下的屈曲问题求解	(184)
5.3.1.3	四边简支层合板, 在均匀剪力 \bar{N}_{xy} 作用下的屈 曲问题能量解法	(187)
5.3.2	对称角铺设层合板	(193)
5.3.3	规则非对称正交铺设层合板	(196)
5.3.4	规则反对称角铺设层合板	(199)
5.3.5	正交各向异性复合材料层合平板的后屈曲 求解	(201)
5.3.6	正交各向异性复合材料层合平板在双轴载 荷作用下的屈曲和后屈曲求解	(219)
5.3.7	正交异性复合材料层合板在压剪组合载荷 作用下的三角有限差分解法	(234)
5.4	特殊层合板振动问题的求解	(251)
5.4.1	特殊正交各向异性层合板	(252)
5.4.2	对称角铺设层合板	(254)
5.4.3	规则非对称正交铺设层合板	(257)
5.4.4	规则反对称角铺设层合板	(260)
5.5	耦合效应的机理分析	(263)
5.5.1	耦合效应的机理	(263)

5.5.2	耦合效应消除和减小的机理	(270)
5.5.3	耦合效应的可利用性	(273)
5.6	横向剪切效应的影响	(274)
5.6.1	板呈柱形弯曲时的弹性力学精确解	(274)
5.6.2	横向剪切影响的近似处理	(279)

第六章 复合材料层合薄壳的弯曲、振动与屈曲问题的

	求解	(287)
6.1	各向异性层合圆柱壳的Reissner型修正理论	(287)
6.1.1	基本方程式	(288)
6.1.2	层合圆柱壳自由振动问题的求解	(294)
6.1.3	正交各向异性圆柱壳在局部法向载荷下弯曲问题的求解	(296)
6.2	各向异性层合圆柱壳的Donnell-Mushtali近似理论	(302)
6.2.1	基本方程式	(302)
6.2.2	层合圆柱壳弯曲问题的求解	(304)
6.2.3	层合圆柱壳自由振动问题的求解	(307)
6.2.4	层合圆柱壳屈曲问题的求解	(308)
6.3	复合材料层合圆柱壳的屈曲问题考虑前屈曲变形影响时的求解	(310)
6.3.1	引言	(310)
6.3.2	基本方程式	(312)
6.3.3	考虑前屈曲变形的平衡方程的求解	(314)
6.3.4	屈曲方程	(316)
6.3.5	屈曲载荷的求解	(317)
6.3.6	数值结果分析	(318)
6.3.6.1	正交各向异性壳的结果	(319)

6.3.6.2	非对称正交层合壳的结果	(320)
6.3.7	简要地概述	(326)
6.3.7.1	轴压屈曲载荷	(326)
6.3.7.2	侧压屈曲载荷	(328)
6.4	复合材料圆柱壳在轴压载荷作用下屈曲与后屈曲特性的能量解法	(329)
6.4.1	基本方程式	(329)
6.4.2	总势能及驻值势能原理	(335)
6.4.3	屈曲载荷的经典解	(338)
6.4.4	三层壳的数值分析及后屈曲特性	(340)
6.4.5	初始缺陷的影响分析	(344)
第七章	复合材料结构力学专题研究	(347)
7.1	许用值与安全系数	(347)
7.1.1	许用值	(347)
7.1.1.1	许用值的基准	(347)
7.1.1.2	单向板许用值的确定	(348)
7.1.1.3	层合板许用值的确定	(350)
7.1.1.4	设计许用应变的确定	(353)
7.1.2	安全系数	(354)
7.1.2.1	安全系数确定的一般考虑	(354)
7.1.2.2	复合材料结构安全系数的确定	(355)
7.2	层间应力分析	(356)
7.2.1	一般概念	(356)
7.2.2	层间应力的计算方法	(358)
7.2.2.1	三维有限元法和准三维有限元法	(358)
7.2.2.2	有限差分法	(358)
7.2.2.3	三角级数法	(361)
7.2.2.4	简化解法	(367)
7.2.3	设计中对层间应力的考虑	(371)

7.3 开口强度分析	(372)
7.3.1 带椭圆孔和圆孔正交各向异性板的强度 分析	(372)
7.3.2 点应力破坏准则和平均应力破坏准则	(382)
7.4 机械连接孔和孔边应力分析	(384)
7.4.1 弹性理论方法	(385)
7.4.2 有限元素法	(392)
7.4.3 接触问题解法	(393)
7.4.4 失效准则	(393)
7.5 疲劳强度与耐久性设计	(395)
7.5.1 复合材料疲劳行为特点	(395)
7.5.2 疲劳损伤机理与疲劳寿命图	(396)
7.5.3 复合材料疲劳特性	(400)
7.5.4 耐久性设计	(401)
7.6 损伤容限	(401)
7.6.1 复合材料缺陷与损伤	(402)
7.6.2 复合材料韧性机理	(403)
7.6.3 带孔和带裂纹层合板损伤韧性分析	(406)
7.7 复合材料气动弹性剪裁	(409)
7.7.1 复合材料气动弹性剪裁的定义	(409)
7.7.2 气动弹性剪裁的性能效益	(411)
7.7.3 复合材料翼面颤振方程	(417)
7.7.4 综合优化设计	(426)
7.8 湿热效应	(427)
7.8.1 单层板的热膨胀系数和湿膨胀系数	(429)
7.8.2 层合板的热弹性	(432)
7.8.3 层合板的残余应力与强度分析	(435)
第八章 试验研究方法	(449)

8.1	引 言	(449)
8.2	静态力学性能测试	(452)
8.2.1	拉伸性能测试	(452)
8.2.2	压缩性能测试	(455)
8.2.3	纵向剪切性能测试	(457)
8.2.4	弯曲性能测试	(459)
8.2.5	层间剪切强度测试	(461)
8.3	断裂/损伤容限测试	(462)
8.3.1	断裂韧性测试	(462)
8.3.2	边缘分层拉伸试验——韧性树脂层合板层 间断裂韧性 G_c 的近似测定法	(464)
8.3.3	开孔拉伸和压缩强度测试	(466)
8.3.4	冲击后的压缩试验	(467)
8.3.5	三突缘板冲击损伤试验	(469)
8.4	疲劳/耐久性试验	(470)
8.4.1	概述	(470)
8.4.2	轴向载荷疲劳性能测试	(472)
8.4.3	耐久性试验	(473)
	综合习题	(474)
	参考文献	(485)

第一章 绪 论

1.1 复合材料的发展历史及其应用

最近几十年由于先进技术对材料性能提出了更高的要求，而常用材料又不能满足这些要求，从而使人们对复合材料的兴趣迅速增长。

其实，复合材料的增强概念并不是新的概念。复合材料使用的历史可以追溯到几千年以前的古老年代。古代采用粘土和稻草砌成泥墙；中世纪用不同材料层合做成的弓（以木材为芯、受拉面胶有平行的纤维，受压面胶上牛角）、剑和盔甲就是很好的例证。近代的胶合板和钢筋混凝土结构实际上都可以算是复合材料。现代复合材料从本世纪40年代使用玻璃纤维增强聚合物基体复合材料（俗称玻璃钢）算起仅有几十年的历史。玻璃纤维增强复合材料因刚度较低，限制了它在结构件上的应用。60年代高模量碳纤维的出现，碳纤维/环氧复合材料F-111水平安定面的研制成功，开始了复合材料在高性能航空、航天结构上的应用。此后，碳纤维、芳纶纤维相继问世，并很快形成了商品化产品，与此同时，适合各种使用环境要求的多种环氧树脂可供设计者选用，这不仅使复合材料成为高性能结构的理想的结构材料，而且也使复合材料成为科学技术上的一大突破。

玻璃纤维增强环氧树脂复合材料制作的直升机旋翼系统，合理利用材料的刚度和阻尼特性，设计成了结构简单、使用和维修方便的无铰式旋翼，不仅使直升机的机动性和加速性都得到改善，而且寿命几乎达到了无限。先进复合材料优异的比强度和比刚度、出色的韧性和弹性变形能力，使1986年Burt Rutan公

司及其合作者设计、制造的Voyager(旅行者号)全复合材料飞机,经受住了多次暴风雷雨的袭击,创下了不着陆环球飞行的世界纪录。复合材料独特的气动弹性剪裁设计特性,使美国格鲁门公司鸭式气动布局的X-29前掠翼飞机于1987年试飞成功。纤维增强复合材料不反射无线电波、微波透过性好和无磁性,使其



图1-1 Voyager全复合材料飞机

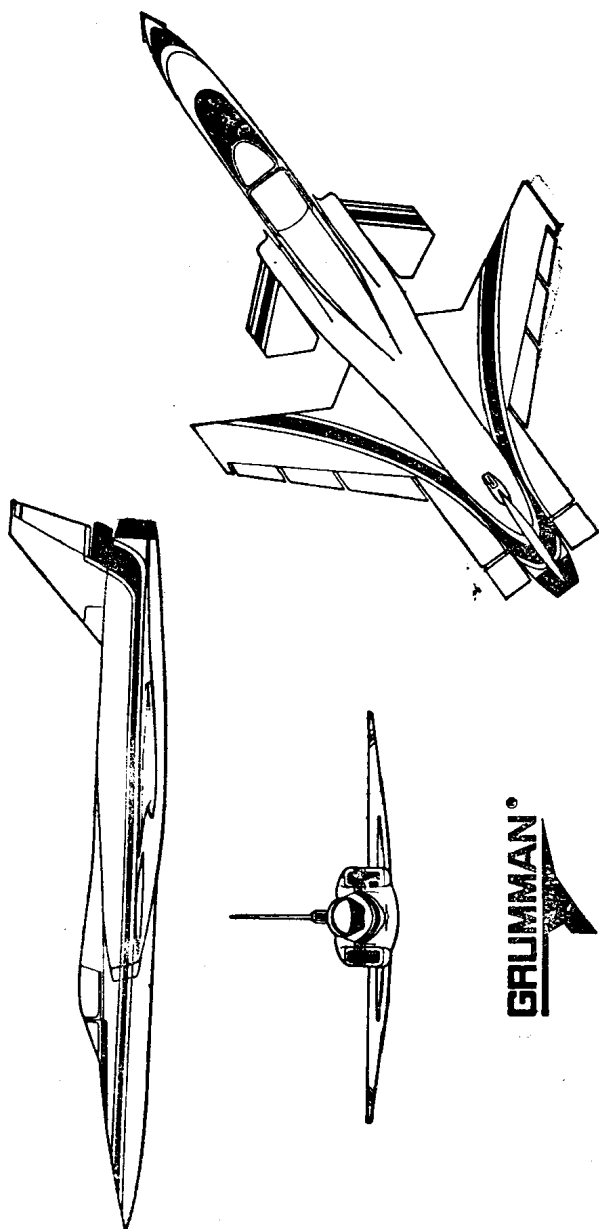


图1-2 X-29前掠翼飞机

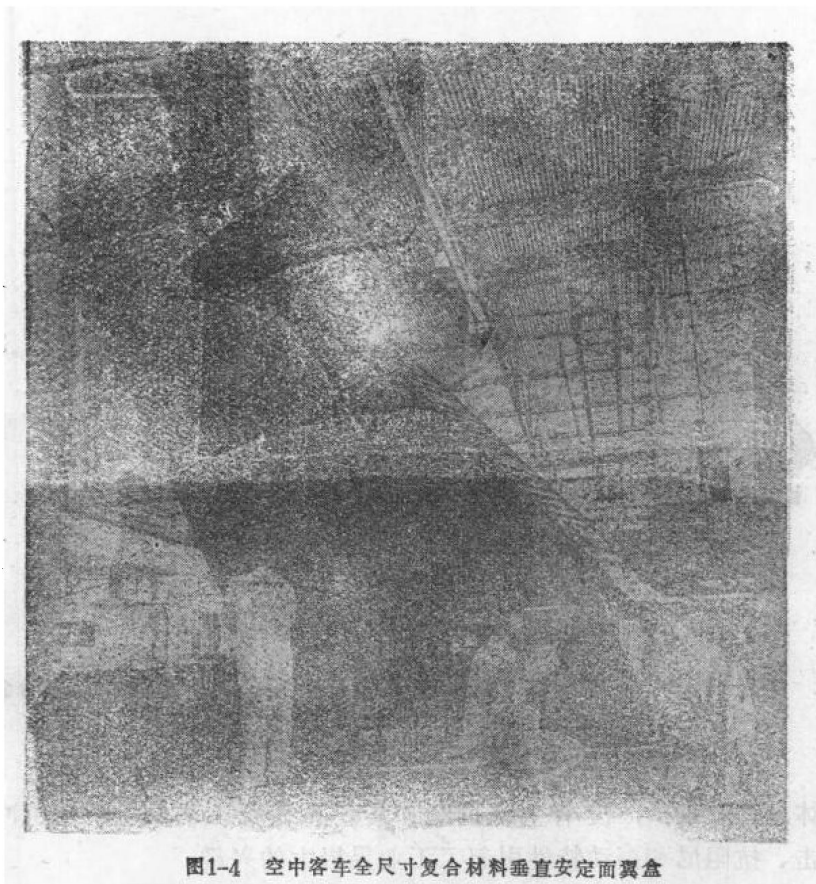


图1-4 空中客车全尺寸复合材料垂直安定面翼盒

务飞机，目前正在经受着飞行考验。

先进复合材料用于娱乐、运动器材是另一个很重要的应用方面。自1983年以来，每年有几百吨碳纤维被用于制造网球、橡皮球和高尔夫球的球拍、撑杆跳杆和钓鱼杆，还用于包括自行车、划艇的划桨和舵面以及一切对重量、刚度和强度有特殊要求的构件上。

先进复合材料将会对汽车工业带来挑战和冲击。复合材料重量轻，合理代用钢材后可以减重70%，使用中节油60%；便于整